

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти бакалавр
на тему: **«Розробка світлодіодного освітлення тепличних комплексів»**

КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
Електротехніка, електроенергетика та
електромеханіка
спеціальності 141 Електротехніка,
електроенергетика та електромеханіка
ступеня вищої освіти бакалавр
групи 141ЕЕ_бд_2023[1](стн (Зр.))
Комар Владислав Віталійович
Керівник: канд. техн. наук, доцент
Басова Ю.О.

Полтава – 2026 рік

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 4 розділів, 3 додатки, 15 таблиць, 14 рисунків, 35 використаних джерел, 51 сторінки.

Об'єкт дослідження – система штучного електричного освітлення тепличного комплексу при багатоярусному вирощуванні культур.

Предмет дослідження – процеси моделювання, світлотехнічного розрахунку, конструктивної розробки та економічного обґрунтування світлодіодної системи освітлення.

Мета роботи – моделювання, розробка та обґрунтування енергоефективної багатоярусної системи освітлення тепличного комплексу для вирощування салату.

Практична значимість та реалізація досліджень полягає у створенні енергоощадної системи освітлення для вирощування салату на багатоярусних установках. У роботі виконано повний світлотехнічний розрахунок, підбрано обладнання, проведено аналіз енергоспоживання та економічна оцінка, що робить цей проєкт придатним до впровадження на реальному об'єкті

У **першому розділі** розглянуто біофізичні основи фотосинтезу, вплив спектрального складу світла на морфогенез рослин та проведено порівняльний аналіз джерел світла для теплиць.

У **другому розділі** надано загальну характеристику тепличного господарства та описано технологічні умови вирощування салату у закритому ґрунті.

У **третьому розділі** виконано моделювання та аналіз результатів розрахунку освітленості окремих блоків і всього комплексу, а також розроблено конструкцію багатоярусної стелажної установки.

У **четвертому розділі** проведено техніко-економічний розрахунок проєкту, оцінено показники окупності та розглянуто питання охорони праці під час монтажу та експлуатації системи.

Практичні результати роботи – розроблені технічні рішення можуть бути використані при проєктуванні багатоярусних систем освітлення для вирощування зеленних культур.

Рекомендації щодо використання результатів роботи – для практичного впровадження у процесі реконструкції існуючих тепличних господарств та створення вертикальних ферм.

Сфера застосування результатів роботи – при проєктуванні систем внутрішнього освітлення агропромислових об'єктів.

Текст роботи пройшов перевірку на наявність текстових запозичень за допомогою системи "StrikePlagiarism" та є оригінальним на 87,54 %.

АНОТАЦІЯ

У дипломному проєкті розглянуто питання проєктування високоефективної системи внутрішнього освітлення тепличного комплексу з використанням багатоярусних стелажних установок та світлодіодних технологій. Проведено світлотехнічне моделювання та розрахунок параметрів освітленості згідно з агротехнічними вимогами до вирощування салату, виконано обґрунтований підбір спектрально-ефективного обладнання. Здійснено техніко-економічне обґрунтування проєкту, проведено порівняльний аналіз енергоспоживання та розраховано термін окупності. Особлива увага приділена питанням охорони праці, електробезпеки у вологому середовищі та пожежної безпеки. Результати роботи можуть бути використані для модернізації існуючих тепличних господарств та впровадження технологій вертикального фермерства.

**СВІТЛОДІОДНЕ ОСВІТЛЕННЯ, ТЕПЛИЧНИЙ КОМПЛЕКС,
БАГАТОЯРУСНА УСТАНОВКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕКОНОМІЧНЕ
ОБґРУНТУВАННЯ, ОХОРОНА ПРАЦІ.**

ABSTRACT

The diploma project addresses the design of a highly efficient indoor lighting system greenhouse complex using multi-tier rack units and LED technologies. Lighting modeling and calculation of illumination parameters were performed in accordance with the agrotechnical requirements for lettuce cultivation, and a justified selection of spectrally effective equipment was made. A technical and economic justification of the project was carried out, a comparative analysis of energy consumption was performed, and the payback period was calculated. Special attention is paid to the issues of labor protection, electrical safety in humid environments, and fire safety. The results of the work can be used for the

modernization of existing greenhouse facilities and the implementation of vertical farming technologies.

LED LIGHTING, GREENHOUSE COMPLEX, MULTI-TIER SYSTEM,
LETTUCE CULTIVATION, ENERGY EFFICIENCY, ECONOMIC
JUSTIFICATION, LABOR PROTECTION.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	9
1.1 Біофізичні основи фотосинтезу та поняття фотосинтетично активної радіації	9
1.2 Вплив спектрального складу світла на морфогенез рослин	11
1.3 Порівняльний аналіз джерел світла для теплиць	14
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК І ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ...	18
2.1 Загальна характеристика тепличного господарства	18
2.2 Умови вирощування салату у закритому ґрунті	19
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРОЄКТУ ОСВІТЛЕННЯ У ТЕПЛИЦІ	21
3.1 Моделювання та аналіз результатів розрахунку освітленості окремих блоків теплиці	22
3.2 Моделювання та аналіз результатів розрахунку освітленості тепличного комплексу	27
3.3 Розробка багатоярусної установки стележного типу зі світлодіодними джерелами світла	29
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЄКТУ	31
4.1 Економічна частина	31
4.1.1. Методика та завдання техніко-економічного аналізу	31
4.1.2. Розрахунок капітальних витрат на модернізацію системи освітлення ...	31
4.1.3. Порівняльний аналіз енергетичних витрат	33

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Кваліфікаційна робота	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Комар В.В.				н	5	45
Перевірив		Басова Ю.О.				ПДАУ, 2026 р.		
Керівник		Басова Ю.О.						
Н. контр.		Басова Ю.О.						
Затверд.		Попов С.В.						

4.1.4. Експлуатаційні витрати та амортизаційні відрахування	35
4.1.5. Оцінка збільшення продуктивності та доходу.....	36
4.1.6. Розрахунок показників економічної ефективності, соціальний та екологічний ефект	36
4.2 Охорона праці.....	37
4.2.1. Електробезпека в умовах підвищеної вологості.....	37
4.2.2. Безпека при обслуговуванні багатоярусних установок	38
4.2.3. Захист від шкідливого впливу оптичного випромінювання	38
4.2.4. Пожежна безпека.....	39
ВИСНОВКИ.....	40
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	42

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

У сучасних умовах підвищених вимог до інтенсифікації агропромислового виробництва та енергоефективності, проектування систем штучного освітлення тепличних комплексів набуває особливого значення. Рівень та спектральний склад освітлення безпосередньо впливають на продуктивність овочевих культур, якість врожаю, терміни вегетації, а також економічну ефективність функціонування господарств у міжсезонний період [1, 2].

Розвиток світлодіодних технологій, впровадження багатоярусних стелажних систем вирощування та використання програмного забезпечення для тривимірного моделювання освітлювального середовища відкривають нові можливості для створення високопродуктивного та енергозберігаючого середовища світлокультури.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є моделювання, розробка та обґрунтування енергоефективної багатоярусної системи освітлення тепличного комплексу для вирощування салату.

Для досягнення мети були поставлені такі **завдання**:

- проаналізувати біофізичні основи фотосинтезу, вплив спектрального складу світла на морфогенез рослин та існуючі умови освітлення об'єкта;
- обґрунтувати вибір джерел світла та світлотехнічного обладнання для багатоярусної стелажної установки;
- виконати моделювання внутрішнього простору теплиці та провести розрахунок параметрів освітленості окремих блоків і всього комплексу;
- розробити конструктивне рішення багатоярусної установки стелажного типу з інтегрованим СВД-освітленням;
- здійснити техніко-економічний розрахунок проекту, визначити термін окупності та соціально-екологічний ефект від впровадження;
- розглянути питання охорони праці, електробезпеки та пожежної безпеки під час експлуатації освітлювальної системи.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є система штучного електричного освітлення тепличного комплексу при багатоярусному вирощуванні культур. **Предмет** дослідження – процеси моделювання, світлотехнічного розрахунку, конструктивної розробки та економічного обґрунтування світлодіодної системи освітлення.

Методи дослідження. У роботі використано методи світлотехнічного розрахунку, порівняльного аналізу, графічного 3D-моделювання (в спеціалізованому ПЗ), економічного аналізу, а також аналізу нормативної документації.

Практичне значення роботи. Робота має практичну цінність як приклад комплексного підходу до модернізації тепличних господарств шляхом впровадження вертикального фермерства та енергоефективного світлодіодного освітлення.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Робота містить 15 таблиць та 14 рисунків. Обсяг основної частини роботи відповідає встановленим вимогам до кваліфікаційних робіт бакалавра.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Біофізичні основи фотосинтезу та поняття фотосинтетично активної радіації

Правильне освітлення для рослин – це освітлення, що створює оптимальні умови для фотосинтезу. Іншими словами, воно має бути біоефективним [1- 3].

Ключовими для фотосинтезу є хлорофіли і каротиноїди – пігменти, що входять до складу всіх здатних до фотосинтезу рослинних організмів. Серед них основну роль у поглинанні енергії світла відіграють: хлорофіл-а, хлорофіл-в, β -каротин. Названі пігменти поглинають світло фіолетового, синього, синьо-зеленого і червоного діапазонів (рис. 1.1).

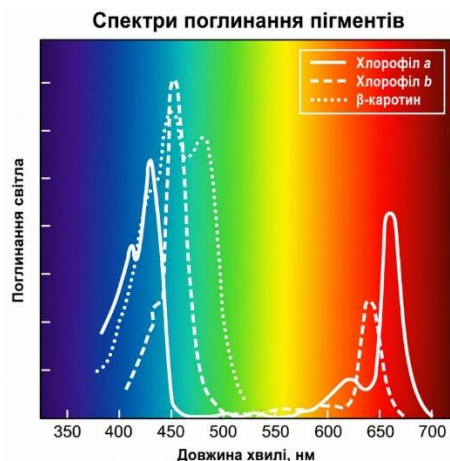


Рисунок 1.1 - Спектр поглинання світла рослинними організмами [1]

Після аналізу спектра поглинання світла рослинними організмами встановлено, що найбільш ефективними для процесів фотосинтезу є синій (400–500 нм) та червоний (630–660 нм) діапазони випромінювання. Саме в цих спектральних областях спостерігаються максимуми поглинання хлорофілу-а та хлорофілу-в, які забезпечують перетворення світлової енергії у хімічну. Синій спектр сприяє формуванню міцної вегетативної частини рослини, розвитку листового апарату та регуляції морфогенезу, тоді як червоний спектр активізує процеси фотосинтезу,

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цвітіння та плодоношення. Саме тому сучасні фітосвітільники переважно використовують комбінацію синіх і червоних світлодіодів для забезпечення максимальної біологічної ефективності освітлення.

Саме хлорофіл-а має вирішальне значення для перетворення енергії світла в хімічну енергію фотосинтезу.

Очевидно, що біоефективне освітлення (освітлення, спектр якого максимально відповідає процесам фотосинтезу) повинно мати у своєму складі достатню кількість світла саме таких кольорів. Структура його спектру має відповідати структурі спектра поглинання хлорофілів і каротиноїдів. Таке світло називають фотосинтетично активною радіацією (ФАР).

ФАР – це частина сонячного випромінювання в діапазоні довжин хвиль 380-750 нм (видиме світло), яку рослини використовують для фотосинтезу, росту, розвитку та накопичення органічних речовин, є критично важливим фактором для сільського господарства та екосистем, що вимірюється як важливий показник потенційної продуктивності рослин [4, 5].

Деколи в густих посівах або в теплицях у похмурі дні інтенсивність ФАР є недостатньою. Це призводить до ослаблення процесу фотосинтезу та, відповідно, до зменшення продуктивності посівів. Коли ж світловий потік хвиль потрібної довжини більший за компенсаційну точку, то інтенсивність фотосинтезу зростатиме.

Приріст органічної маси збільшуватиметься тільки в межах освітленості до 200-280 Вт/м². При більшій освітленості приросту не буде. Основним фактором, від якого залежить поглинання і пропускання ФАР, є відношення площі листової поверхні до площі поля. Встановлено, що найбільше ФАР поглинається тоді, коли площа листової поверхні перевищує площу поля в 4 рази і більше, тобто коли вона становить не менше 40 тис/м² на 1 га. Поглинання ФАР залежить від густоти стояння рослин в ценозі. Для кожної культури вона різна. Оптимальна густота стояння для озимої пшениці - 3,0-3,5 млн шт./га, ярих зернових - 3,5-4,0 млн шт./га, кукурудзи

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на зерно - 50-60 тис. шт./га, цукрових буряків - 80-100 тис. шт./га, картоплі - не менше, як 50-60 тис шт./га [4].

1.2 Вплив спектрального складу світла на морфогенез рослин

Світлові прилади, що застосовуються для освітлення рослин в теплицях, або в так званих «вертикальних» фермах називаються фітосвітільниками. Біоефективне світло, яке випромінюється фітосвітільниками називають фотосинтетичним фотонним потоком – PPF (Photosintetic Photon Flux - фотосинтетичний фотонний потік). Вимірюється в мкмоль/с [6, 7]. Наприклад, світильник FLORA-250 потужністю 250 Вт випромінює PPF = 820–850 мкмоль/с [8]. І це саме фотосинтетичний фотонний потік, тобто світло, яке можна назвати правильним для фотосинтезу. Воно має у своєму складі велику частку синього і червоного спектральних діапазонів (рис .1.2).

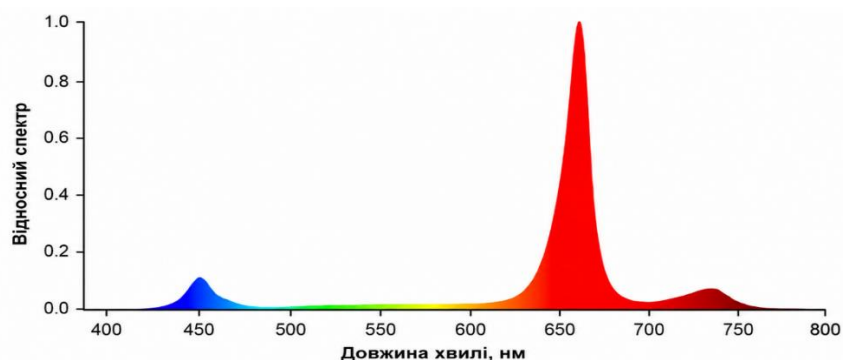


Рисунок 1.2 - Спектр фотосинтетичного фотонного потоку фітосвітільника FLORA-250

Кількість фотосинтетичних фотонів, що падає на одиницю площі поверхні за одну секунду, називається щільністю фотосинтетичного фотонного потоку – PPFD (Photosintetic Photon Flux Density - щільність фотосинтетичного фотонного потоку). Вимірюється в мкмоль/с·м².

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відомо, що для різних культур, які вирощуються в теплицях, для отримання високих врожаїв потрібно забезпечити певну щільність фотосинтетичних фотонів, наприклад:

- 75 мкмоль/с·м² для салатів, грибів, орхідей;
- 150 мкмоль/с·м² для коренеплодів;
- 250 мкмоль/с·м² для полуниці, перцю, дрібних томатів («чері»), цитрусових;
- понад 300 мкмоль/с·м² для троянд, крупних томатів, огірків, баштанних [9].

Часто кількість біоефективного світла, яке отримують рослини оцінюється таким параметром, як добова сума світла ДСС (DLI - Daily Light Integral – добова світлова інтегральна доза). ДСС вимірюється в моль/м² · доба. Значення цього параметру легко визначити, якщо відома щільність фотосинтетичного фотонного потоку (PPFD) (1.1)

$$DLI = PPFD \cdot 3600 \cdot T / 1\,000\,000 \text{ моль/м}^2 \cdot \text{доба} \quad (1.1)$$

де T – кількість годин протягом доби, коли в теплиці присутнє світло.

На відкритому повітрі рослини отримують ДСС від 5 до 60 моль/м² · доба залежно від пори року, погоди, тривалості дня [10, 11]. В теплицях цей параметр зменшується в середньому на 30–40 %. Але, в будь-якому разі, для нормального фотосинтезу рослинам в теплицях потрібно забезпечити рівень ДСС ≥ 10 моль/м² · доба. І чим вище його значення, тим вищий буде врожай.

Коли відомо PPF фітосвітльників і параметри світлорозподілу, то відносно легко вирахувати PPFD для конкретних теплиць і умов застосування цих світльників. Для цього використовуються відповідні комп'ютерні програми, наприклад, програмний комплекс DIALux 4.13 для світлотехнічного моделювання [12]. За отриманим значенням PPFD можна розрахувати і ДСС, скориставшись (1.1).

В будь-якому разі, важливо, щоб світло мало в своєму складі певну кількість світла саме таких кольорів, які будуть найбільш ефективними для нашої культури.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При цьому, завжди доцільно в спектрі випромінювання фітосвітільників мати якусь долю білого світла. Це сприяє нормальному сприйняттю кольорів персоналом теплиць, відповідає гігієнічним вимогам і сприяє кращому розповсюдженню світла в нижні яруси крони рослин.

Кожна довжина хвилі по-різному впливає на розвиток рослин (табл. 1.1)

Таблиця 1.1 – Вплив спектрального складу світла на морфогенез рослин

Діапазон довжин хвиль, нм	Колір світла	Біологічний вплив на рослини
400–500	Синє	Сприяє проростанню насіння, зміцненню стебла, формуванню компактної структури рослини, підвищує холодостійкість
500–600	Зелене	Забезпечує глибоке проникнення світла в нижні яруси рослинного покриву, покращує фотосинтез у затінених частинах
630–660	Червоне	Стимулює фотосинтетичну активність, сприяє росту, укоріненню, цвітінню та дозріванню плодів
≈730	Далеке червоне	У поєднанні із синім світлом стимулює розвиток пагонів і розширення крони; при дефіциті синього світла сприяє витягуванню стебла

Правильне налаштування спектрального складу штучного освітлення є одним із ключових факторів ефективного керування фізіологічними та морфологічними процесами розвитку рослин. Завдяки можливості варіювання інтенсивності та співвідношення окремих спектральних компонентів світла можна цілеспрямовано впливати на основні етапи онтогенезу рослин.

Зокрема, оптимально підібраний спектр дозволяє регулювати швидкість росту рослин, оскільки різні довжини хвиль по-різному впливають на процеси поділу та розтягування клітин. Синя складова спектра, як правило, стримує надмірне витягування стебла, тоді як червона стимулює інтенсивний ріст біомаси.

Важливим аспектом є вплив світла на фотоморфогенез, тобто процеси формування структури та зовнішнього вигляду рослин під дією світлових сигналів.

Через систему фоточутливих рецепторів (фітохромів, криптохромів тощо) рослини реагують на спектральний склад світла, що визначає їх архітектуру, розміщення листків, товщину стебла та інші морфологічні ознаки.

Крім того, спектральний склад освітлення суттєво впливає на формування крони рослин, забезпечуючи оптимальний розподіл світлової енергії між верхніми та нижніми ярусами. Наявність зеленого компоненту спектра сприяє глибшому проникненню світла, що особливо важливо для густих насаджень.

Особливе значення має роль світла у процесах цвітіння, які регулюються фотоперіодичними реакціями рослин. Червоне та далеке червоне світло впливають на активацію або пригнічення генеративної фази розвитку, що дозволяє керувати термінами цвітіння.

Не менш важливим є вплив спектра на плодоутворення та дозрівання плодів. Правильно підібране освітлення забезпечує інтенсивний фотосинтез, накопичення органічних речовин та формування якісної продукції з високими товарними характеристиками.

Таким чином, регулювання спектрального складу штучного освітлення є ефективним інструментом керування продуктивністю та якістю рослинницької продукції в умовах закритого ґрунту [9-11, 13].

1.3 Порівняльний аналіз джерел світла для теплиць

Фітолампи відіграють важливу роль у створенні оптимальних умов для росту рослин у теплицях [13]. Вони забезпечують необхідний рівень освітленості та спектральний склад випромінювання, що максимально відповідає потребам фотосинтезу і фотоморфогенезу рослин. Використання фітоламп дозволяє компенсувати дефіцит природного освітлення в осінньо-зимовий період, а також підтримувати стабільні умови вирощування незалежно від кліматичних факторів.

Типи ламп для підсвітки теплиць включають натрієві лампи високого тиску, металогалогенні лампи та сучасні світлодіодні (СВД) джерела світла. Кожен із цих

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

типів має свої переваги та обмеження, що визначають доцільність їх застосування залежно від технологічних вимог, енергетичної ефективності та необхідного спектрального складу випромінювання (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 - Типи ламп для підсвітки теплиць [13]

Тип лампи	Світловий спектр	Енергоефективність	Тепловиділення	Термін служби
Світлодіодні фітолампи	Налаштовується, широкі спектральні діапазони	Висока	Мінімальне	до 50 000 годин
Металогалогенні (МН)	Близький до денного, з перевагою синього	Середня	Високе	до 8 000 годин
Натрієві лампи високого тиску (HPS)	Переважно червоно-жовтий спектр	Середня	Високе	до 10 000 годин
Лампи HID (загально)	Від синього до червоного, залежно від типу	Середня-висока	Високе	до 10 000 годин
Компактні люмінесцентні (CFL)	Широкий спектр, часто холодне світло	Середня	Середнє	до 8 000 годин
Індукційні лампи	Близький до природного, стабільний	Висока	Низьке	до 100 000 годин
Галогенні	Тепле біле світло	Низька	Високе	до 2 000 годин
Комбіновані системи	Регульований, змішаний спектр	Висока (залежить від складу)	Залежить від типів	комбінований ресурс

Для освітлення тепличних комплексів застосовуються різні типи ламп, кожен з яких має свої особливості експлуатації та сфери використання. Найбільш сучасними та ефективними є світлодіодні фітолампи, які забезпечують можливість формування необхідного спектрального складу світла, легко масштабуються для багаторушних систем та характеризуються високою енергоефективністю. Основним їх недоліком є відносно висока початкова вартість обладнання.

Металогалогенні лампи (МН) добре підходять для вегетативної фази розвитку рослин завдяки переважанню синьої складової спектра. Водночас вони характеризуються значним тепловиділенням, тому потребують додаткових систем охолодження.

Високонатрієві натрієві лампи (HPS) традиційно широко використовуються у тепличному господарстві. Вони забезпечують інтенсивне червоно-жовте

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випромінювання, що особливо ефективно під час цвітіння та плодоношення рослин. Часто такі лампи застосовують у поєднанні з іншими джерелами світла для компенсації спектральних недоліків.

Лампи типу НІД використовуються переважно у великих тепличних приміщеннях. Їх особливістю є необхідність застосування пускорегулювальної апаратури (баластів), що ускладнює конструкцію системи освітлення.

Компактні люмінесцентні лампи (CFL) придатні для невеликих теплиць та парників, однак поступаються світлодіодним джерелам світла за інтенсивністю випромінювання та енергоефективністю.

Індукційні лампи характеризуються дуже тривалим терміном служби та стабільними світлотехнічними характеристиками, проте через високу вартість застосовуються обмежено.

Галогенні лампи мають низьку ефективність у тепличному господарстві, оскільки виділяють значну кількість тепла та потребують додаткового охолодження, що підвищує енергетичні витрати.

Комбіновані системи освітлення дозволяють найбільш точно регулювати спектральний склад світла відповідно до фаз розвитку рослин. Такі системи забезпечують високі показники ефективності, однак є більш складними у налаштуванні та експлуатації.

Традиційно в теплицях використовували натрієві лампи високого тиску (НЛВД). Вони забезпечували високу освітленість, але мали недоліки: великий нагрів, невисока енергоефективність, обмежений спектр, короткий термін служби (25–30 тис. год) [14, 15].

Сучасною альтернативою стали світлодіодні фітосвітильники. Їх переваги полягають у наступному: можливість створення будь-якого спектру, у 2 і більше рази вища ефективність, менше тепловиділення, довший ресурс (50–60 тис. год), можливість змішаного освітлення [16, 17]. Практичне впровадження світлодіодних систем освітлення у тепличному господарстві демонструє суттєвий позитивний ефект як з точки зору продуктивності, так і якості рослинницької продукції.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зокрема, за результатами досліджень та виробничих впроваджень встановлено, що використання СВД-фітосвітильників дозволяє досягти щільності фотосинтетичного фотонного потоку (PPFD) на рівні до 300 мкмоль/с·м², що відповідає оптимальним умовам для вирощування світлолюбних культур.

Збільшення рівня PPFD безпосередньо впливає на інтенсивність фотосинтезу, що, у свою чергу, сприяє підвищенню врожайності. Наприклад, у вирощуванні троянд зафіксовано зростання врожайності до 60 %, що є суттєвим показником ефективності застосування світлодіодного освітлення. Окрім кількісних показників, спостерігається також покращення якісних характеристик продукції, зокрема підвищення насиченості кольору, рівномірності розвитку квіток та їх товарного вигляду [17, 18].

Таким чином, світлодіодні технології освітлення є одним із ключових елементів сучасних систем штучного освітлення в тепличному господарстві, забезпечуючи високу енергоефективність, можливість гнучкого керування спектральним складом світла та значне підвищення економічної ефективності виробництва.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК І ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ

2.1 Загальна характеристика тепличного господарства

Об'єктом дослідження у дипломній роботі є фермерське господарство, яке розташоване в Полтавській області, Полтавському районі, селі Марченки. Основним напрямом діяльності господарства є вирощування овочевих культур у тепличних умовах. Висока продуктивність тепличного господарства досягається завдяки використанню сучасних сортів рослин і впровадженню інноваційних технологій, зокрема автоматизованих систем керування мікрокліматом (температура, вологість, освітленість) та гідропонних систем живлення рослин.

Важливу роль відіграє система штучного освітлення. У тепличних комплексах широко застосовуються натрієві лампи високого тиску типу ДНаЗ, які мають тривалий термін експлуатації (до 32 000 годин) і додатково виділяють тепло, що сприяє зменшенню витрат на опалення. Для аналізу параметрів освітлювальної установки розглянемо характеристику типової теплиці для вирощування салату (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Основні параметри теплиці для вирощування салату

Параметр	Значення
Тип світильника	ЖСП30Тек-600-013У5
Кількість світильників, шт	630
Загальна потужність, кВт	409,5
Кількість світильників у ряду, шт	14
Кількість світильників у секції, шт	$14 \times 3 = 42$
Кількість секцій («прольотів») у теплиці	60 рядів \times 15 прольотів
Площа теплиці, м ²	4334,4
Річне зниження освітленості	приблизно 5%

Розміщення світильників у теплиці здійснюється рівномірно по рядах, що забезпечує необхідний рівень освітленості для росту рослин. Водночас необхідно

враховувати поступове зниження світлового потоку ламп у процесі експлуатації, що потребує їх періодичної заміни. Це потребує періодичного обслуговування та заміни освітлювального обладнання для підтримання необхідного рівня освітлення.

Таким чином, ефективність функціонування тепличного господарства значною мірою залежить від правильно спроектованої системи освітлення, яка разом із іншими технологічними рішеннями забезпечує оптимальні умови для вирощування сільськогосподарських культур.

2.2 Умови вирощування салату у закритому ґрунті

У межах цієї роботи проведено дослідження параметрів освітленості при вирощуванні листового салату. Дана культура є світлолюбною та невибагливою, що дозволяє здійснювати її посів у закритий ґрунт протягом усього року. Зелені культури характеризуються швидким ростом, високою стійкістю до хвороб і шкідників, а також низькою вимогливістю до складу ґрунту, що забезпечує їх стабільну ринкову затребуваність. Листовий салат є одним із найпопулярніших видів зелені завдяки своїм дієтичним властивостям, а його тепличне виробництво має низку переваг, серед яких: стабільно високий попит в осінньо-зимовий період, можливість підтримки контрольованого мікроклімату для гарантованої врожайності та висока економічна ефективність. Завдяки холодостійкості культури мінімізуються витрати на опалення, а швидке нарощування вегетативної маси дозволяє отримувати кілька врожаїв з однієї площі за сезон.

Згідно з методичними особливостями вирощування [19], ключовим фактором є світловий режим, оскільки при дефіциті освітлення знижується поживна цінність салату, період плодоношення розтягується, а рослини втрачають товарну привабливість через надмірне витягування. Технологія вирощування також передбачає специфічний температурний режим: на початковій фазі для проростання достатньо 12–15 °С, а сходи оптимально розвиваються при денній температурі 12–14 °С та нічній - 6–9 °С. Через два тижні, після формування кореневої системи та під

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

час активного росту листя, температуру підвищують до 14–16 °С, причому існує пряма залежність між інтенсивністю освітлення та необхідними температурними показниками.

Вегетаційний період культури становить від 50 до 70 днів, проте використання розсадного способу дозволяє прискорити процес на 2–3 тижні. Оптимальним часом для культивування є періоди з вересня по грудень та з січня по квітень. Найбільш скороспілими є листові сорти, які висівають насінням, тоді як качанні сорти є пізньостиглими та потребують більш інтенсивного додаткового освітлення. Попри відносну невибагливість, успішне вирощування салату в промислових масштабах вимагає обов'язкової організації систем додаткового штучного освітлення, обігріву та регулярного поливу для запобігання втрати якості продукції.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОЄКТУ ОСВІТЛЕННЯ У ТЕПЛИЦІ

Проектування освітлення у теплиці здійснювали за допомогою програмного комплексу DIALux версія 4.13/ Програма DIALux проводить світлотехнічні розрахунки, враховуючи безліч факторів, які не враховуються при проектуванні освітленості за табличними методами. Це найбільш точний інструмент світлотехнічного проектування. DIALux дозволяє оцінити результат за різними видами діаграм розподілу освітленості і тривимірної візуалізації. У DIALux вбудований візуалізатор Pov-ray, що дозволяє отримати фотореалістичне тривимірне зображення розподілу освітленості. Є можливість імпорту планів та експорту результатів розрахунку у AutoCAD [12].

DIALux здійснює розрахунок всіх необхідних світлових характеристик: яскравості, всіх видів освітленості, показників блискучості, коефіцієнт природної освітленості та ін. З його допомогою можна розрахувати денне світло і тіні при плануванні освітлення. Програма бере до уваги географічне розташування будівлі, погодні умови та тіні від навколишніх будівель та інших об'єктів.

Створення 3D моделі об'єкта є однією з основних частин проектування. Побудова 3D моделі здійснювалася за заданими параметрами тепличного комплексу ФОП Ляшко Л. Г. На основі даних про кількість світлових приладів у одного типового блоку (прольотів) ($N=42$ шт.) та у теплиці ($N=630$ шт.) проведено розрахунки та візуалізацію отриманих результатів.

Проектування тепличного комплексу було поділено на такі етапи (рис. 3.1):

Етап 1. Проведення вимірювань освітленості та PPFD у теплиці; виявлення нерівномірності світлового поля між **блоками** (№ 1) **та** (№ 8).

Етап 2. Побудова 3D-моделі теплиці за допомогою програмного продукту DIALux 4.13 з урахуванням географічних координат та світлопрозорих конструкцій; налаштування параметрів природного освітлення (дата, час, стан неба) для синхронізації з експериментом.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Етап 3. Розрахунок освітленості на робочому рівні ($h_1=0,85$ м) та порівняння з реальними даними; дослідження розподілу світла на висотах $h_2=1,4$ м та $h_3=2,6$ м, що виявило значний надлишок енергії у верхній зоні.

Етап 4. Розробка моделі багатоярусної стелажної установки для раціонального використання світлового об'єму; розрахунок параметрів освітленості на полицях стелажа та підтвердження ефективності нового рішення).



Рисунок 3.1 – Етапи проекту освітлення тепличного комплексу

3.1 Моделювання та аналіз результатів розрахунку освітленості окремих блоків теплиці

У даному розділі проведено світлотехнічне моделювання середовища вирощування рослин у тепличному комплексі. Метою розрахунку є перевірка відповідності запропонованого світлового рішення агротехнічним нормам та оцінка рівномірності розподілу світлового потоку.

Об'єктом дослідження виступила теплиця №1 (культура - салат), що складається з 15 прольотів («будиночків»). Габарити столів для вирощування становлять $31,5 \times 8$ м, висота підвісу світильників - 3,05 м. Вимірювання проводилися на висоті 0,85 м від підлоги. Для порівняльного аналізу було обрано блоки №1 та №8.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За результатами вимірювань встановлено, що рівень освітленості в середньому блоці є вищим та рівномірнішим. У крайньому блоці спостерігається зниження показників нижче 10 клк поблизу віконних конструкцій. Рівномірність освітлення в полі росту та розвитку рослин (салат) достатній, рівномірність присутня і складає:

$$Q1 = E_{min} / E_{cp} = 5,45 / 8,87 = 0,614$$

$$Q8 = E_{min} / E_{cp} = 8,38 / 12,38 = 0,676$$

Отже, рівномірність освітлення для блоку №1 склала 0,614 та для блоку №8 – 0,676. Для аналізу та систематизації даних у межах цієї роботи було побудовано контурні діаграми в Excel, що дозволяють наочно відобразити розподіл освітленості у конкретних позиціях прольотів №1 та №8 відповідно (рис. А.1 додатку А). Рис. А.1 демонструє розподіл освітленості у №1 та №8 прольотах тепличного комплексу. Аналіз діаграми показує нерівномірність освітлення по площі прольотів, що обумовлено особливостями розташування світильників та конструкцією приміщення

Додатково було зафіксовано показники щільності фотосинтетичного фотонного потоку (PPFD) для № 8, середнє значення якого склало ≈ 146 мкмоль/(м²·с).

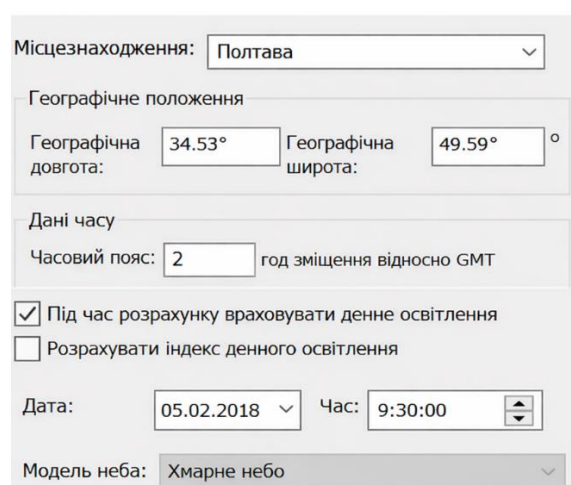
Для пояснення причин нерівномірності освітленості було проведено 3D-моделювання з урахуванням параметрів світлового дня (табл. 3.2) та географічного положення теплиці .

Таблиця 3.2 – Характеристики стану світлового дня на дати проведення експерименту [20]

Дата	Хмарність	Схід Сонця	Тривалість дня	Час проведення вимірювань
05.02.2026	переважно хмарно	07:08	9.35	9:30, 11:30, 13:30, 15:30
06.02.2026	переважно хмарно	07:06	9.39	
07.02.2026	переважно хмарно	07:05	9.42	
08.02.2026	хмарно, можливий сніг	07:03	9.45	
09.02.2026	хмарно з проясненнями / без опадів	07:02	9.48	

Дані наведені для врахування параметрів стану неба при проектуванні 3D-моделі теплиці в середовищі DIALux.

Моделювання виконувалося для двох часових точок: 09:30 (початок експерименту) та 13:30 (максимальне сонцестояння). Параметри природної освітленості в програмі задавалися згідно з рис. 3.3. У програмному середовищі DIALux 4.13 було розроблено тривимірні моделі прольотів № 1 та № 8 теплиці. Розрахунок параметрів освітленості проводився з урахуванням технічних характеристик світильників, наведених у табл. 3.1, що експлуатуються в прольоті №1 теплиці



Місцезнаходження: Полтава

Географічне положення

Географічна довгота: 34.53° Географічна широта: 49.59°

Дані часу

Часовий пояс: 2 год зміщення відносно GMT

Під час розрахунку враховувати денне освітлення

Розрахувати індекс денного освітлення

Дата: 05.02.2018 Час: 9:30:00

Модель неба: Хмарне небо

Рисунок 3.3 – Вкладка параметрів природної освітленості в DIALux

Результати розрахунку освітленості для крайнього блоку та моделі представлені на рис. А.2 та А.3 додатку А. На рис. А.2 наведено модель крайньої секції №1 тепличного комплексу для дослідження параметрів освітлення. Представлено варіанти лише штучного освітлення та комбінованого освітлення із врахуванням природного світла о 9:30. Модель дозволяє оцінити вплив природного освітлення на загальний рівень освітленості у теплиці.

Аналіз 3D-моделі тепличної секції показує, що світильники розташовані рівномірно по площі конструкції, що забезпечує необхідний рівень освітленості для вирощування рослин. Висота монтажу світильників підібрана таким чином, щоб забезпечити достатню щільність фотосинтетичного фотонного потоку (PPFD) без утворення зон надмірного або недостатнього освітлення. Результати моделювання

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

свідчать, що у центральних частинах секції освітленість є більш рівномірною, тоді як у крайових зонах спостерігається незначне зниження рівня освітлення через вплив огорожувальних конструкцій теплиці.

Рис. А.3 додатку А демонструє результати розрахунку освітленості крайньої секції №1 при використанні штучного та комбінованого освітлення. Аналіз результатів показує, що додавання природного освітлення сприяє підвищенню рівня освітленості та покращує рівномірність розподілу світлового потоку в межах секції.

Результати розрахунку на висоті $h_1 = 0,85$ м (табл. 3.3) підтвердили, що о 09:30 частка природного світла мінімальна, а рівномірність зростає до 13:30. Для забезпечення високої точності обчислень було використано розрахункову сітку (растр) розмірністю 64 x 128 точок. Це дозволило детально проаналізувати розподіл світлового потоку по всій площі досліджуваного блоку та об'єктивно визначити коефіцієнти рівномірності освітлення і результати наведені у табл. 3.3

Таблиця 3.3 – Значення освітленості прольоту №1 на висоті $h_1 = 0,85$ м

Растр: 64 x 128 точки	E_{cp} , ЛК	E_{min} , ЛК	E_{max} , ЛК	E_{min}/E_{cp}	E_{min}/E_{max}
В 9:30	6895	3321	9392	0,482	0,354
В 13:30	7760	4935	9595	0,636	0,514

Для детального аналізу розподілу світлового поля у вертикальній площині було встановлено додаткові розрахункові поверхні на двох рівнях: $h_2 = 1,4$ м та $h_3 = 2,6$ м від поверхні стелажа в кожному з досліджуваних блоків. Результати моделювання у градаціях сірого представлені на рисунках А.4-А.5 додатку А

Згідно з отриманими даними, для часового інтервалу 09:30 зафіксовано коливання освітленості в діапазоні від 3000 до 15000 лк на висоті $h_2 = 1,4$ м та від 2460 до 98400 лк на висоті $h_3 = 2,6$ м. Таким чином, спостерігається закономірне зростання інтенсивності випромінювання при скороченні відстані до джерел світла: порівняно з основним робочим рівнем ($h_2 = 1,4$ м), освітленість зростає втричі на рівні $h_2 = 1,4$ м і більш ніж у 10 разів на рівні $h_3 = 2,6$ м.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такі високі показники освітленості у верхніх зонах теплиці та відповідні витрати на електропостачання свідчать про нераціональне використання світлового об'єму при одноярусному методі вирощування. Отримані результати обґрунтовують доцільність оптимізації тепличного комплексу шляхом впровадження багоярусних (стелажних) систем. Це дозволить ефективно використовувати світловий потік у верхніх точках приміщення та суттєво збільшити обсяг виробництва зеленої культури (зокрема, салату) на тій самій площі. Встановлено, що освітленість на верхніх ярусах у 3 і більше разів перевищує рівень робочої зони.

Рис. А.4 та А.5 додатку А демонструють градації сірого для оцінки рівня освітленості у тепличних прольотах №1 та №8 на різних висотах розташування робочої поверхні. Аналіз результатів показує, що зі збільшенням висоти спостерігається підвищення рівномірності розподілу освітленості по площі прольоту. Також встановлено, що у центральних зонах прольотів освітленість є вищою порівняно з крайовими ділянками, що пояснюється особливостями розташування світильників та впливом природного освітлення.

Таблиця 3.4 – Значення освітленості будиночку №1 на висотах h_2 та h_3

Растр: 64 x 128 точки	Час	E_{cp} , ЛК
$h_2=1,4$ м	9:30	11703
	13:30	12340
$h_3=2,6$ м	9:30	12868
	13:30	13288

Аналогічні розрахунки було проведено для прольоту №8.

Таким чином, припущення підтвержені розрахунковими даними та корелюють із результатами експерименту, розрахованими для часових точок 09:30 (для крайнього прольоту №1) та 13:30 (для середнього прольоту №8).

Крім того, аналіз отриманих розрахункових значень освітленості у двох прольотах дозволяє зробити висновок, що у прольоті №8 середня освітленість є дещо вищою, ніж у прольоті №1. Це пояснюється тим, що у середньому прольоті

№8 сумарний вплив освітлювальних приладів на робочу поверхню вищий, ніж у крайньому прольоті №1. Також на результати впливають показники природної освітленості: вони значно переважають на поверхні крайнього прольоту №1, що пов'язано з більшою площею проникнення світла через засклення бічних огорожень

3.2 Моделювання та аналіз результатів розрахунку освітленості тепличного комплексу

Для визначення показників освітленості в загальному об'ємі теплиці було розроблено тривимірну модель внутрішнього простору споруди. Зовнішні поверхні стін та покрівлі змодельовано як світлопрозорі конструкції (вікна) для врахування фактору природного освітлення. При цьому було зафіксовано параметри географічного положення (координати м. Полтава), а змінні складові - час, дата та стан неба - задавалися відповідно до умов проведення експерименту. 3D-модель загальної салатової теплиці наведена на рисунку Б.1, а результати розрахунку штучної освітленості із застосуванням натрієвих ламп - на рисунку Б.2 Додатку Б. Використані світильники охарактеризовані у табл. 3.5

Таблиця 3.5 – Відомість використаних світильників

Параметр	Значення
Кількість	630 шт.
Світловий потік (світильник)	90027 лм
Світловий потік (лампа)	90000 лм
Потужність світильника	600,0 Вт
Класифікація світильника за CIE	100
Код CIE Flux	31 64 96 100 100
Комплектація	1 × НЛВД ReFlux 600 Вт (поправочний коефіцієнт 1,000)
Тип джерела світла	Натрієва лампа високого тиску (НЛВД)

Таблиця 3.6 – Освітленість салатної теплиці з урахуванням природного освітлення

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Растр: 64 x 128 точки	E_{cp} , лк	E_{min} , лк	E_{max} , лк	E_{min}/E_{cp}	E_{min}/E_{max}
В 9:30	7099	3282	13604	0,462	0,241
В 13:30	7287	3467	13639	0,476	0,254

Для візуалізації експериментальних даних було розроблено світлотехнічні сцени, що демонструють роботу освітлювальних приладів для крайнього (№1) та середнього (№8) блоків відповідно.

З метою аналізу параметрів освітленості в загальному об'ємі теплиці над зазначеними блоками було встановлено розрахункові поверхні на рівні 0,85 м від підлоги (рис. Б.3 додатку Б)

Порівняльний аналіз отриманих результатів (рис. Б.1., рис. Б.3 додатку Б) із показниками освітленості в крайньому (№1) та середньому (№8) блоках салатної теплиці дозволяє зробити наступні висновки. У крайньому блоці розрахункові дані практично не відрізняються від локальних моделей, проте вони на два порядки нижчі за експериментальні значення. У середньому ж блоці показники, отримані за допомогою світлотехнічних сцен загальної моделі теплиці, є значно меншими як за результати розрахунку окремого фрагмента, так і за експериментальні дані.

Фактично, на висоті 1,4 м від поверхні стелажа існують технічні передумови для розміщення додаткового ярусу рослин у сприятливих умовах освітлення, проте у тепличному комплексі така можливість наразі не реалізована. Внесок природного світла ще більше підвищує рівень загальної освітленості в цій зоні. Нераціональне використання світлового потоку є недоцільним; натомість оптимізація внутрішнього простору дозволила б суттєво збільшити обсяги вирощування салату або інших низькорослих культур.

Сучасне багатоярусне виконання установок [21] є ергономічним та ефективним з точки зору використання корисної площі. Таке рішення дозволяє уникнути додаткових витрат на будівництво спеціальних приміщень, скорочує витрати на логістику та зберігання, а також мінімізує терміни монтажу та пусконаладжувальних робіт (ПНР). Автоматизована система керування забезпечує повний контроль технологічних процесів, включаючи рекуперацію

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тепла, регулювання концентрації CO_2 та асиміляційне освітлення. Це дозволяє оптимізувати роботу обладнання та значно підвищити загальну енергоефективність тепличного комплексу

3.3 Розробка багатоярусної установки стелажного типу зі світлодіодними джерелами світла

В опромінювальних установках стелажного типу вимірювання параметрів світлового середовища проводять стосовно однієї довільно обраної полиці стелажа. Вимірювання здійснюють у горизонтальній площині на рівні посадки рослин (за їх відсутності) у контрольних точках, схема розташування яких представлена на рис. 3.4 [21-23].

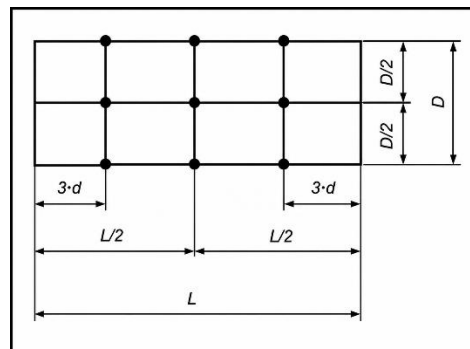


Рисунок 3.4 – Схема розташування контрольних точок вимірювання горизонтальної опроміненості в багатоярусних установках стелажного типу

(● – контрольна точка; L – довжина полиці; D – ширина полиці).

На рис. 3.4 наведена схема розташування контрольних точок для виконання світлотехнічних розрахунків або вимірювання освітленості на робочій поверхні приміщення. Точки розташовані рівномірно по площі контрольної зони, що дозволяє оцінити рівномірність розподілу світлового потоку. Стелажі спроектовані у вигляді секцій (дод. Б), які можуть бути об'єднані в єдиний автоматизований промисловий багатоярусний модуль. Це дозволяє здійснювати вирощування культур у великих обсягах із кратним збільшенням комерційної вигоди. При

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

побудові моделі було враховано наступні стандартні розміри секцій: довжина – 2100 мм; ширина – 1200 мм; висота – 3800 мм; відстань між полицями – 500 мм». Використані світильники охарактеризовані у табл. 3.7.

Зазначена крива сили світла (КСС) забезпечує високу рівномірність розподілу освітленості на полицях багатоярусної установки (додаток В). Це досягається за рахунок взаємного перекриття світлових плям від суміжних джерел світла (табл. 3.8)

Таблиця 3.7 – Відомість використаних світильників

Параметр	Значення
Кількість	60 шт.
Світловий потік (світильник)	1814 лм
Світловий потік (лампа)	1814 лм
Потужність світильника	25,0 Вт
Класифікація світильника за СІЕ	100
Код СІЕ Flux	47 79 96 100 100
Комплектація	1 × відповідно до специфікації користувача (поправочний коефіцієнт 1,000)

Таблиця 3.8 – Значення освітленості у багатоярусній установці

Растр 32×32	E_{cp} , лк	E_{min} , лк	E_{max} , лк	E_{min}/E_{cp}	E_{min}/E_{max}
1 полка (зверху)	2881	1586	4365	0,551	0,363
2 полка	2874	1408	4389	0,490	0,321
3 полка	2821	1385	4301	0,491	0,322
4 полка	2897	1562	4526	0,539	0,345
5 полка	2799	1399	4320	0,500	0,331
6 полка	2847	1383	4285	0,486	0,323

Така конструкція дозволяє найбільш оптимально використовувати обмежений простір. Система також дозволяє економічніше вирощувати не тільки зелень (основна культура більшості вертикальних ферм), а й інші низькорослі рослини

РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЄКТУ

4.1 Економічна частина

4.1.1. Методика та завдання техніко-економічного аналізу

Метою даного розділу є визначення економічної доцільності впровадження багаторівневої світлодіодної системи освітлення у порівнянні з існуючою системою на базі ламп ДНаЗ. Перехід на СВД-технології в умовах господарства розглядається не лише як засіб економії електроенергії, а й як інструмент інтенсифікації виробництва завдяки використанню вертикального об'єму теплиці.

Основними завданнями аналізу є:

- визначення обсягів капітальних інвестицій для модернізації.
- розрахунок прямих експлуатаційних витрат.
- порівняння енергетичної ефективності систем.
- визначення термінів окупності та чистого економічного ефекту [2].

4.1.2. Розрахунок капітальних витрат на модернізацію системи освітлення

Капітальні вкладення (K) включають вартість придбання світлотехнічного обладнання, металоконструкцій для багаторівневих стелажів, монтажні роботи та пусконаладження системи керування.

$$K_{заг} = K_{обл} + K_{монт} + K_{дод} \quad (4.1)$$

де $K_{обл}$ - вартість обладнання;

$K_{монт}$ - монтажні роботи;

$K_{дод}$ - додаткові витрати.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вартість обладнання враховує вартість 630 комплектів лінійних СВД-світильників (по 6 шт на кожен стелажний модуль). Оскільки СВД-світильники мають вищу ціну порівняно з лампами ДНаЗ, цей показник у проектному варіанті буде вищим. Монтажні роботи зазвичай становлять 15–20% від вартості обладнання. Додаткові витрати включають автоматизацію поливу та вентиляції для багатоярусної установки. Для реалізації проекту багатоярусного вирощування салату необхідно розрахувати вартість основного світлотехнічного та конструкційного обладнання. У табл. 4.1 наведено зведений кошторис для переоснащення однієї типової секції (прольоту), який згодом масштабується на всю площу теплиці.

Таблиця 4.1 – Зведений кошторис обладнання для впровадження багатоярусної світлодіодної системи

Найменування обладнання / робіт	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за од., грн	Загальна сума, грн
Світильник світлодіодний лінійний (фіто-спектр, 25 Вт)	шт.	3780	1150,00	4347000,00
Стелажна металоконструкція (6 ярусів, модуль 2.1 м)	компл.	105	18400,00	1932000,00
Система автоматизації поливу та контролю вологості	компл.	15	45000,00	675000,00
Кабельно-провідникова продукція та щити керування	м/шт	1	280000,00	280000,00
Контролер керування спектром та інтенсивністю (диммер)	шт.	15	12500,00	187500,00
Разом обладнання	–	–	–	7421500,00
Монтажні та пусконаладжувальні роботи (15%)	–	–	–	1113225,00
Усього капітальних витрат	–	–	–	8534725,00

Аналіз зведеного кошторису показує, що найбільшу частку капітальних витрат становлять світлодіодні фітосвітильники та багатоярусні стелажні конструкції, які формують основу системи штучного освітлення тепличного комплексу. Загальна вартість обладнання складає 7421500 грн, а з урахуванням

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

монтажних і пусконаладжувальних робіт повний обсяг капітальних витрат становить 8 534 725 грн.

4.1.3. Порівняльний аналіз енергетичних витрат

Електроенергія є найбільшою статтею витрат у тепличному господарстві. Річні витрати на електроенергію (C_e) розраховуються за (4.2):

$$C_e = P_{cm} T_p T_{ar} \quad (4.2)$$

де P_{cm} – встановлена потужність системи;

T_p – середня тривалість роботи системи штучного додаткового освітлення в осінньо-зимовий період;

T_{ar} – розрахунковий тариф на електроенергію для агропромислових підприємств.

Базовий варіант (система на базі ламп ДНаЗ). Згідно з технічними характеристиками тепличного комплексу, встановлена потужність існуючої освітлювальної установки становить $P_{cm} = 407$ кВт. Основним показником, що визначає річні експлуатаційні витрати, є споживання електроенергії протягом періоду додаткового освітлення рослин $P_{cm} = 409,5$ кВт; $T_p = 3500$ год/рік; $T_{ar} = 7,50$ грн/кВт·год. Встановлена потужність системи базового варіанта з урахуванням втрат у пускорегулювальній апаратурі (споживання одного світильника з ПРА становить 0,65 кВт) складає: $630 + 0,65 = 409,5$ кВт.

За підрахунками, річні витрати для базового варіанту становлять:

$$C_e = 409,5 \cdot 3500 \cdot 7,50 = 10749375,00 \text{ грн.}$$

Проектний варіант (світлодіодна система). Запропоноване рішення передбачає перехід на 6-ярусну стелажну технологію вирощування з використанням спеціалізованих світлодіодних фітосвітильників. Основна перевага даного варіанта

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

полягає у високій спектральній ефективності джерел світла. На відміну від ламп ДНаЗ, спектр випромінювання світлодіодів максимально наближений до кривої поглинання фотосинтетично активної радіації (ФАР).

Завдяки вузькоспрямованому спектральному складу та можливості розміщення джерел світла у безпосередній близькості до рослин (багаторівнева система), проектна установка забезпечує необхідний рівень ФАР при значно меншій споживаній потужності. Згідно з розрахунками та результатами моделювання, енергоспоживання світлодіодної системи на одиницю корисного світлового потоку є на 40–50% нижчим порівняно з натрієвими лампами високого тиску.

Таким чином, використання світлодіодних технологій у багаторівневому виконанні дозволяє досягти суттєвого зниження встановленої потужності об'єкта, що безпосередньо впливає на зменшення собівартості готової продукції та підвищення загальної рентабельності тепличного господарства.

Порівняння між базовим варіантом (існуючі 630 світильників з лампами ДНаЗ-600) та проектним варіантом (багаторівнева світлодіодна система) наведена у табл 4.2. Розрахунок базується на часі роботи 3500 год/рік та тарифі 7,50 грн/кВт·год [27].

Таблиця 4.2 – Порівняння річних експлуатаційних витрат для двох варіантів освітлення

Витрати	Базовий варіант	Проектний варіант	Різниця, грн
Встановлена потужність системи, кВт	409,5	94,5	-315,0
Річне споживання електроенергії, кВт·год	1433250	330750	-1102500
Витрати на оплату електроенергії, грн	10749375,00	2480625,00	8268750,00
Витрати на заміну ламп (матеріали), грн	380000,00	0,00	380000,00
Заробітна плата обслуговуючого персоналу, грн	120000,00	45000,00	75000,00
Амортизаційні відрахування (10%), грн	450000,00	853472,50	-403472,50
Загальні експлуатаційні витрати, грн	11699375,00	3379097,50	8320277,50

Аналіз експлуатаційних витрат показує, що впровадження багатоярусної світлодіодної системи освітлення дозволяє суттєво знизити енергоспоживання тепличного комплексу. Встановлена потужність системи зменшується з 409,5 кВт до 94,5 кВт, що забезпечує скорочення річного споживання електроенергії на 1 102 500 кВт·год.

У результаті витрати на оплату електроенергії зменшуються на 8 268 750 грн на рік. Крім того, використання світлодіодних світильників дозволяє повністю усунути витрати на регулярну заміну ламп, характерні для натрієвих джерел світла. Також спостерігається зменшення витрат на обслуговування системи освітлення та оплату праці персоналу.

Незважаючи на збільшення амортизаційних відрахувань у проектному варіанті, загальні експлуатаційні витрати знижуються з 11 699 375 грн до 3 379 097,50 грн. Загальний річний економічний ефект від впровадження світлодіодної системи становить 8 320 277,50 грн

4.1.4. Експлуатаційні витрати та амортизаційні відрахування

Важливою перевагою світлодіодних систем є тривалий термін служби (більше 50 000 год.). Для ламп ДНаЗ передбачено щорічну заміну (близько 5–10% від загальної кількості) через деградацію світлового потоку. У проектному варіанті ці витрати відсутні протягом перших 10 років.

Амортизація (A) розраховується прямолінійним методом (4.3):

$$A = (K N_a) / 100 \quad (4.3)$$

де N_a – норма амортизаційних відрахувань.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1.5. Оцінка збільшення продуктивності та доходу

Багатоярусна установка дозволяє збільшити вихід продукції з 1 м² площі теплиці. Якщо при традиційному методі врожайність салату становить V_1 кг/м², то при 6-ярусному вирощуванні (4.4):

$$V_2 = V_1 n k_i \quad (4.4)$$

де n – кількість ярусів (6),

k_i – коефіцієнт інтенсифікації.

Це веде до різкого зростання грошового виторгу (ΔD):

$$\Delta D = (V_2 - V_1) \cdot S \cdot C_{реал} \quad (4.5)$$

4.1.6. Розрахунок показників економічної ефективності, соціальний та екологічний ефект

Прийняття рішення про модернізацію системи освітлення тепличного комплексу базується на оцінці динамічних показників, що враховують часову вартість грошей та ризики інвестування в агротехнічний сектор

Термін окупності ($T_{ок}$) визначає період, за який сумарна річна економія на операційних витратах та додатковий чистий прибуток від реалізації врожаю повністю покривають початкові капітальні вкладення ($K_{дод}$) (4.6).

$$T_{ок} = K_{дод} / E_{річ} \quad (4.7)$$

де $E_{річ}$ – річна економія на витратах та додатковий прибуток від врожаю.

Для проєктів з впровадження енергоефективного світлодіодного освітлення в умовах вертикального фермерства нормативним вважається термін 2,5–3,5 роки. У нашому випадку, завдяки кратному збільшенню площі вирощування за рахунок багатоярусності, термін окупності може бути скорочений.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Чистий дисконтований дохід (NPV) дозволяє оцінити прибутковість проєкту з урахуванням зміни вартості грошей у часі.

Індекс рентабельності (PI) це відношення прибутку до інвестицій. Показник демонструє відносну прибутковість на кожен інвестовану гривню. Якщо $PI > 1$, проєкт вважається ефективним. Для систем світлодіодної модернізації високий PI зумовлений тривалим життєвим циклом обладнання (понад 10 років) та низькими витратами на експлуатацію. Окрім прямих фінансових вигод, перехід на багаторівні світлодіодні установки забезпечує низку нематеріальних переваг, які мають стратегічне значення для сталого розвитку фермерського господарства.

Використання натрієвих ламп високого тиску (ДНаЗ) пов'язане з певними екологічними ризиками, оскільки вони містять пари ртуті та потребують спеціалізованої дорогої утилізації [28]. Світлодіодні джерела світла є повністю безпечними, не містять токсичних речовин і відповідають міжнародним стандартам RoHS [29]. Крім того, зниження енергоспоживання на 45–50% безпосередньо корелює зі зменшенням викидів вуглекислого газу (CO_2), що утворюється при генерації електроенергії, зміцнюючи «зелений» імідж підприємства.

4.2 Охорона праці

4.2.1. Електробезпека в умовах підвищеної вологості

Тепличні комплекси за класифікацією ПУЕ [30] належать до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом через високу вологість та наявність струмопровідного пилу, що вимагає впровадження комплексних заходів електробезпеки. Усі світлотехнічні вироби, включаючи світильники, розподільчі коробки та комутаційну апаратуру, повинні мати ступінь захисту оболонки не нижче IP65, що гарантує повну герметичність від пилу та стійкість до прямих струменів води під час поливу чи дезінфекції приміщень. Проєктне рішення обов'язково передбачає створення системи вирівнювання потенціалів та надійне заземлення (занулення) усіх металевих частин багаторівневих стелажних

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструкцій і корпусів світильників згідно з чинними нормами ПУЕ [30]. Для забезпечення оперативного захисту персоналу від витоків струму через вологі конструкції або випадкового дотику до струмопровідних частин на лініях живлення встановлюються пристрої захисного відключення (ПЗВ) із порогом спрацювання не більше 30 мА. Крім того, при обслуговуванні нижніх ярусів стелажів та проведенні регламентних робіт у зонах із надмірною вологістю для переносних світильників і ручного електроінструменту слід використовувати безпечну наднизьку напругу в діапазоні від 12 до 36 В.

4.2.2. Безпека при обслуговуванні багатоярусних установок

При експлуатації та обслуговуванні 6-ярусних конструкцій ключовим фактором безпеки є запобігання падінню персоналу та обладнання з висоти. Для забезпечення безпечного доступу до верхніх рівнів установки, висота якої сягає 3,8 м, необхідно використовувати виключно інвентарні підмостки або спеціалізовані візки-підйомники, оснащені захисними бортами висотою не менше 1,1 м. Особливу увагу при проєктуванні приділено вимогам ергономіки: вузли кріплення світильників розроблені таким чином, щоб їх технічне обслуговування або заміна могли здійснюватися оперативно, без необхідності повного чи часткового демонтажу стелажного ярусу. Такий підхід не лише мінімізує час перебування працівника на висоті, а й запобігає механічному пошкодженню рослин та елементів гідропонної системи під час регламентних робіт.

4.2.3. Захист від шкідливого впливу оптичного випромінювання

Окрему увагу в проєкті приділено захисту персоналу від шкідливого впливу оптичного випромінювання та гарантуванню фотобіологічної безпеки. Оскільки сучасні світлодіодні системи часто мають високу частку синього спектра (Blue light hazard), що при тривалому впливі може пошкоджувати сітківку ока, підбір обладнання здійснювався з урахуванням вимог ДСТУ EN 62471:2014. Проєктом передбачено використання світильників, що за ступенем небезпеки відповідають групам ризику RG0 (відсутність ризику) або RG1 (низький ризик).

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для додаткового захисту працівників при тривалому перебуванні в зоні інтенсивного СВД-опромінення зі спеціалізованим фітоспектром є обов'язковим використання засобів індивідуального захисту органів зору — окулярів із відповідними селективними світлофільтрами.

4.2.4. Пожежна безпека

Заходи з пожежної безпеки тепличного комплексу базуються на контролі температурного режиму та використанні вогнестійких матеріалів. Блоки живлення (драйвери) СВД-світильників повинні встановлюватися виключно на негорючі основи для запобігання перегріву та займання. При влаштуванні електричних мереж передбачено використання кабельних ліній із маркуванням нг-LS (що не поширюють горіння, з низьким димо- та газовиділенням). Це є критично важливим для закритих приміщень теплиць, де наявна значна кількість пластикових лотків, полімерної плівки та інших горючих елементів гідропонних систем, що дозволяє мінімізувати ризики виникнення та розповсюдження пожежі.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання розробки енергоефективної системи світлодіодного освітлення тепличного комплексу для вирощування листового салату в умовах закритого ґрунту. На основі аналізу науково-технічної літератури встановлено важливу роль фотосинтетично активної радіації та спектрального складу світла у процесах фотосинтезу, морфогенезу і формування врожайності рослин. Проведений порівняльний аналіз джерел світла показав переваги світлодіодних фітосвітильників над традиційними натрієвими лампами високого тиску за показниками енергоефективності, ресурсу роботи та можливості керування спектром випромінювання.

У роботі досліджено особливості функціонування тепличного господарства та проаналізовано умови вирощування салату у закритому ґрунті. Встановлено, що ефективність вирощування культури значною мірою залежить від параметрів штучного освітлення, рівномірності розподілу світлового потоку та підтримання необхідного мікроклімату.

За допомогою програмного комплексу DIALux 4.13 виконано моделювання освітлення окремих блоків теплиці та всього тепличного комплексу. Проведено аналіз освітленості та щільності фотосинтетичного фотонного потоку (PPFD), визначено нерівномірність освітлення у крайніх та центральних секціях теплиці. Результати моделювання підтвердили доцільність використання багатоярусної стелажної системи, що дозволяє більш раціонально використовувати світловий об'єм теплиці та підвищити ефективність використання електричної енергії.

У межах роботи розроблено конструкцію багатоярусної установки зі світлодіодними джерелами світла та виконано техніко-економічне обґрунтування запропонованого рішення. Встановлено, що застосування світлодіодного освітлення дозволяє зменшити енергоспоживання, підвищити рівень освітленості та забезпечити необхідні умови для стабільного вирощування салату протягом року.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також у роботі розглянуто питання охорони праці, електробезпеки та пожежної безпеки під час монтажу й експлуатації системи освітлення у вологому середовищі теплиці.

Отримані результати можуть бути використані при модернізації існуючих тепличних господарств, впровадженні технологій вертикального фермерства та проектуванні сучасних енергоефективних систем штучного освітлення агропромислових об'єктів.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Правильне освітлення теплиць – запорука високої врожайності. URL: [WIPO Academy Resource Platform](#) (дата звернення: 06.04.2026).
2. Білоконь Т. М. Економічні аспекти впровадження енергозберігаючих технологій на підприємствах закритого ґрунту. Збірник наукових праць ВНАУ. 2012. № 1(56). Т. 2. С. 146–151.
3. Гіль Л. С. Сучасні технології овочівництва закритого і відкритого ґрунту. Ч. 1. Закритий ґрунт : навч. посіб. Вінниця : Нова книга, 2008. 368 с.
4. Все що треба знати про сонячну радіацію та урожай. URL: [Plastimet](#) (дата звернення: 06.04.2026).
5. Барабаш Ю., Сич З. Д., Носко В. Л. Догляд за овочевими культурами. Київ : Нововведення, 2008. 122 с.
6. У чому різниця між потоком фотонів та щільністю потоку фотонів? URL: [Green Future](#) (дата звернення: 06.04.2026).
7. Освітлення у рослин: розуміємо PPFD та DLI. URL: [LED Ukraine](#) (дата звернення: 06.04.2026).
8. Фітосвітильник LED FLORA 250 3,4 RW EUROLAMP. URL: [EUROLAMP](#) (дата звернення: 06.04.2026).
9. Повний гід для початківців і досвідчених садівників. URL: [Plastimet](#) (дата звернення: 06.04.2026).
10. Козирський В. В., Савченко В. В. Світлотехніка та електротехнологія в сільському господарстві : підручник. Київ : Аграрна освіта, 2015. 542 с.
11. Мусієнко М. М. Фізіологія рослин : підручник. 2-ге вид., допов. та перероб. Київ : Либідь, 2005. 808 с.
12. DIALux : сайт програмного комплексу для світлотехнічних розрахунків. URL: [DIALux](#) (дата звернення: 04.01.2024).

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Світлодіодне освітлення для теплиць. URL: [SVETUM](#) (дата звернення: 06.04.2026).
14. Суворова К. І. Джерела світла : навч. посіб. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021.
15. Споживачі електричної енергії. Електричне освітлення : навч. посіб. / О. І. Соловей та ін. ; за ред. О. І. Солов'я. Черкаси : ФОП Гордієнко Є. І., 2018. 132 с.
16. Кожушко Г. М., Басова Ю. О., Губа Л. М. Порівняння динаміки світлових та колірних характеристик компактних люмінесцентних та світлодіодних ламп в процесі строку служби. Технологический аудит и резервы производства. 2016. № 4(1). С. 60–63. URL: [Surl.li](#) (дата звернення: 06.04.2026).
17. Світлодіоди у фермерському та сільському господарстві. URL: [5WATT](#) (дата звернення: 06.04.2026).
18. Як правильно освітити теплицю: практичні поради. URL: [LED Ukraine](#) (дата звернення: 06.04.2026).
19. Хареба В. В., Приліпка О. В., Коуц В. М. Овочівництво закритого ґрунту : підручник. Київ : Аграрна наука, 2013. 320 с.
20. Погода у Полтаві 08.02.2026. URL: [Sinoptik.ua](#) (дата звернення: 08.02.2026).
21. Кузьмич В. І. Розробка проекту освітлення багатоярусних конструкцій тепличних комплексів : кваліфікаційна робота бакалавра : спец. 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / наук. кер. М. М. Зінь. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. 55 с.
22. Велит І. А. Вибір джерела світла для оптичного опромінення рослин томатів, огірків та розсади. Перспективні напрямки сучасної електроніки : матеріали XI наук.-практ. конф. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 128–132.
23. Андрійчук В. А. Енергоощадні джерела світла для світлокультури рослин. Світлотехніка. 2014. № 1. С. 41–47.

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. Беліков О. Є. Штучне освітлення рослин захищеного ґрунту. Наукові праці. Екологія. 2014. № 220. С. 20–23.

25. Сизонова І. В. Енергетичний аналіз як передумова енергозбереження в сільському господарстві. Вісник ХНАУ. Серія «Економіка АПК і природокористування». 2004. № 2. С. 210–214.

26. Приліпка О. В. Інноваційний розвиток ефективного функціонування підприємств закритого ґрунту: теорія, методологія, практика : монографія. Київ : Майстер-принт, 2008. 336 с.

27. Про затвердження тарифів на електроенергію, що відпускається юридичним особам : постанова НКРЕКП від 28.12.2023 № 2614 (зі змінами на 2025–2026 рр.).

28. Рибалочка А., Сорокін В., Кожушко Г., Басова Ю. Екологічна та економічна оцінка енергоекономічних ламп побутового призначення. Світлолюкс : український світлотехнічний журнал. 2013. № 3. С. 16–21.

29. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. URL: [EUR-Lex](#) (date of access: 06.04.2026).

30. Правила улаштування електроустановок. Харків : Форт, 2017. 760 с.

31. НПАОП 01.0-1.01-12. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві : затв. наказом МНС України від 14.08.2012 № 1125. Київ : Основа, 2012. 124 с.

32. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок : затв. наказом Держнаглядохоронпраці України від 06.10.1997 № 257. Київ : Основа, 1997. 148 с.

33. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіон України, 2018. 138 с.

34. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи за освітньо-професійною програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю G3

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

«Електрична інженерія» галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво» /
Попов С., Басова Ю., Семенов А., Бичков Я. Полтава : ПДАУ, 2025. 32 с. URL:
<https://dspace.pdau.edu.ua/handle/123456789/19981> (дата звернення: 02.01.2026).

					КРБ.141ЕЕбд_41[1].06.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

ДОДАТКИ

3D-моделі тепличного комплексу та результати розрахунку освітленості в середовищі

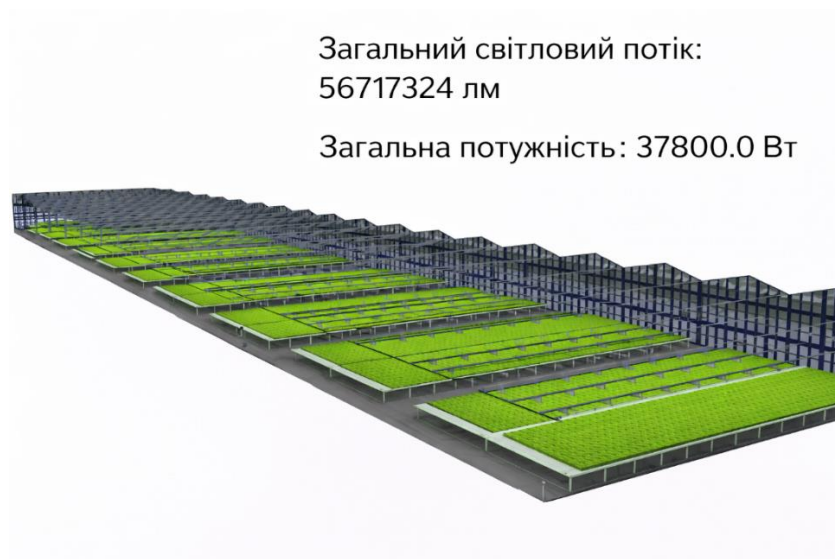


Рисунок Б.1 – 3D-моделі тепличного комплексу та результати розрахунку освітленості в середовищі

Розташування поверхні в приміщенні:

Виділена точка: (0,000 м; 0,000 м; 0,850 м)



Растр: 64 x 128 точок

Середня освітленість, $E_{\text{ср}}$ [лк]	Мінімальна освітленість, $E_{\text{мін}}$ [лк]	Максимальна освітленість, $E_{\text{макс}}$ [лк]	Коефіцієнт нерівномірності освітлення ($E_{\text{мін}} / E_{\text{ср}}$)	Співвідношення мінімальної до максимальної освітленості ($E_{\text{мін}} / E_{\text{макс}}$)
7075	3142	13626	0,444	0,231

Додаток Б

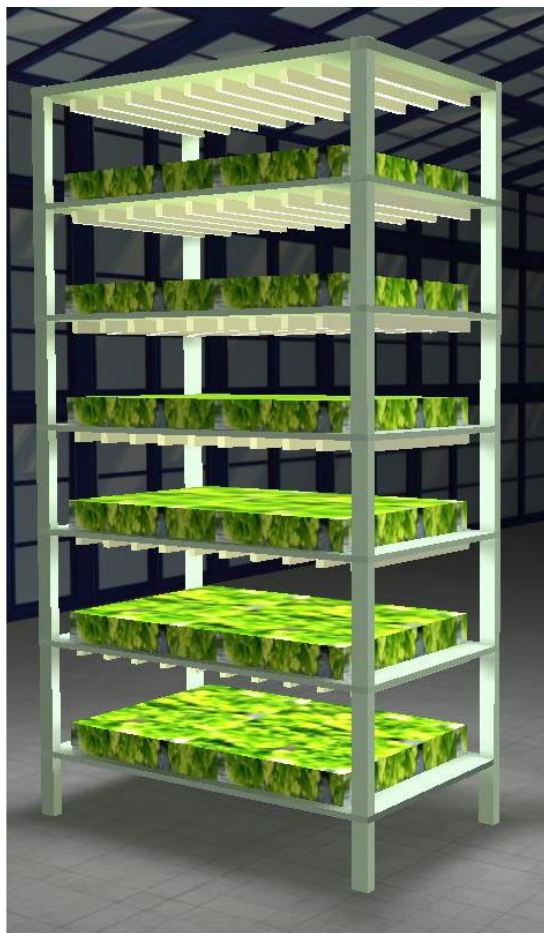


Рисунок В.1 – 3D-модель багатоярусної установки;